

Des zébrures aux motifs à pois

David Andelman

La Recherche n°284 | 01/02/1996

Les surfaces magnétiques, mais aussi bien d'autres systèmes physiques ou chimiques, se structurent spontanément en domaines bien distincts. Ce phénomène peut être compris comme le résultat d'une compétition entre deux forces antagonistes.

Pensez à une barre de métal, un verre de vin ou un tissu vivant. Ces systèmes complexes, composés de beaucoup d'atomes ou molécules, sont homogènes quand on les observe à l'oeil nu, à l'échelle de quelques millimètres ou plus. Du point de vue des physiciens, cette tendance fort répandue et familière de la matière à revêtir un aspect uniforme, du moins à une certaine échelle, a une origine relativement facile à comprendre : les limites, parois ou interfaces qui séparent une région homogène d'une autre, représentent un coût en énergie et sont de ce fait improbables, puisque l'état d'équilibre est celui où l'énergie est minimale.

Il existe pourtant, comme on va le voir, de nombreux contre-exemples à cette homogénéité, c'est-à-dire des situations où la matière forme spontanément, à l'équilibre, des motifs bien définis et délimités. Comment les expliquer ?

Cette question est une composante de l'une des interrogations centrales de la science actuelle : l'origine des formes naturelles.

J'aimerais présenter ici une explication relativement simple à ces variations de forme, de couleur ou de texture. Cette explication s'est dégagée de l'analyse de cas très divers. Récemment, Michael Seul, des laboratoires AT&T Bell (Etats-Unis), et moi-même avons insisté sur son caractère général, et essayé de montrer combien elle est pertinente pour bon nombre de systèmes physiques ou chimiques *à l'équilibre (1)*.

Exemple bien compris depuis les années 1930, grâce aux théoriciens soviétiques Lev Landau et Evgenii Lifshitz : un matériau ferromagnétique, disons une bande magnétique utilisée pour enregistrer de la musique. Une telle surface s'avère compartimentée en de multiples domaines microscopiques, chacun faisant en gros une douzaine de micromètres(2,3). Au sein d'un domaine, les moments magnétiques des atomes sont alignés selon une même direction. Mais d'un domaine à l'autre, l'aimantation change de direction.

Pourquoi en est-il ainsi ? On peut d'abord essayer de comprendre pour quelle raison, au sein d'un domaine donné, les moments magnétiques sont alignés. Le phénomène est lié aux interactions entre les nuages électroniques des atomes, ces derniers déterminant le moment magnétique. Ces interactions, qui résultent du caractère quantique des électrons, sont très importantes dans les matériaux ferromagnétiques, où elles sont telles que deux moments magnétiques voisins tendent à s'orienter dans la même direction.

Les parois entre domaines magnétiques, qui séparent des régions où l'aimantation n'a pas la même orientation, représentent donc une configuration défavorable. Aux parois est associé un coût en énergie. Par exemple, dans un système idéalisé comportant N domaines magnétiques en forme de bandes parallèles, l'énergie totale apportée par les parois vaut N fois l'énergie correspondante à une seule paroi.

Si cette grandeur était la seule énergie importante impliquée, il aurait été naturel de voir les domaines grossir et leur nombre diminuer afin que l'énergie de paroi soit minimale. Mais l'expérience montre que ce scénario, équivalent à une homogénéisation, ne se produit pas. Une autre interaction, de plus longue portée, vient contrecarrer l'énergie de paroi. Il s'agit cette fois d'une force magnétique, celle que chacun a sûrement déjà rencontrée en jouant avec deux aimants identiques : ils tendent très rapidement à s'accoler tête-bêche, pôle nord de l'un contre pôle sud de l'autre. Un système de deux petits domaines d'aimantations opposées possède donc une énergie magnétique moindre que celle d'un domaine unique mais deux fois plus grand.

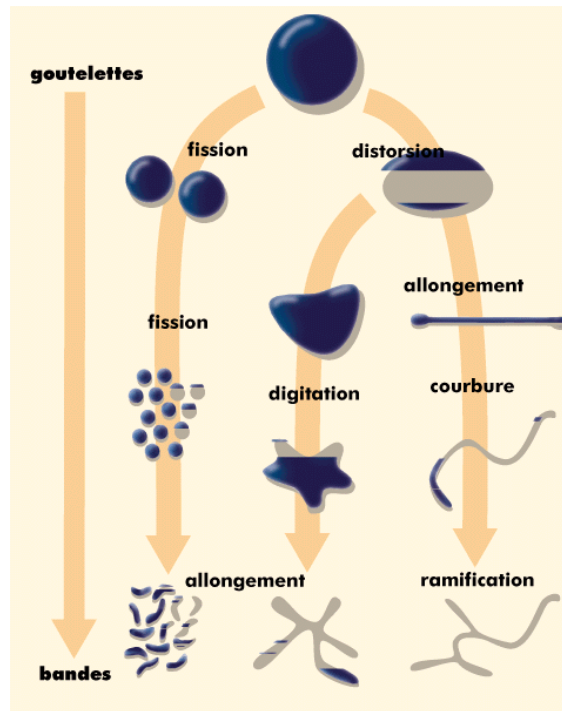
Les domaines dans les systèmes magnétiques peuvent ainsi facilement se comprendre comme le résultat d'une concurrence entre l'énergie de paroi et l'énergie magnétique. L'énergie de paroi est d'autant plus faible que les frontières entre domaines sont réduites ; pour la minimiser, il faudrait donc des domaines grands et peu nombreux. Au contraire, l'énergie magnétique est d'autant plus basse que les domaines sont petits. A l'équilibre, l'énergie totale (énergie de paroi + énergie magnétique) doit être minimale, ce qui conduit à un compromis. La taille moyenne des domaines dépend alors de l'épaisseur du film, de la température et du champ magnétique appliqué.

L'apparition de domaines à l'état d'équilibre comme résultat d'une compétition entre deux forces antagonistes est un phénomène qui ne se limite pas aux systèmes magnétiques ; qui plus est, on l'observe aussi à d'autres échelles, beaucoup plus grandes ou beaucoup plus petites. Et c'est seulement au cours des dernières années que les chercheurs ont pris conscience de sa généralité. Sur des exemples spécifiques, il est possible de calculer - le calcul est parfois fort compliqué - la taille et la forme optimales des domaines, c'est-à-dire celles qui rendent l'énergie minimale.

Les liquides magnétiques, ou ferrofluides(4), sont un exemple où des configurations en forme de zébrures peuvent être vues à l'œil nu, à l'échelle de quelques centimètres. Ce sont des fluides qui ont commencé à être commercialisés dans les années 1960, suite au travail pionnier de Ron E. Rosensweig aux Etats-Unis. Normalement, un ferrofluide constitué de particules magnétiques en suspension dans l'eau ne peut se mélanger avec un autre liquide comme l'huile. L'eau et l'huile se repoussent, phénomène lié simplement au fait que l'énergie d'interface eau-huile est relativement élevée. Cependant, en appliquant des champs magnétiques modestes perpendiculairement à la couche de liquide, le mélange de ferrofluide et d'un autre liquide non miscible peut se structurer spontanément en une sorte de labyrinthe, comme le montrent notamment les travaux récents du groupe de Jean-Claude Bacri, à l'université Paris-VI(4,5) (fig. 1).

Ici aussi, il s'avère que la largeur des rayures peut être estimée(4) : il suffit de considérer un motif de bandes parallèles et de chercher la largeur qui minimise l'énergie totale (énergie d'interface entre le ferrofluide et le deuxième liquide + énergie magnétique). Le défi serait cependant de savoir calculer l'énergie magnétique dans une géométrie arbitraire et compliquée, par exemple celle correspondant au labyrinthe effectivement observé.

Voici maintenant, à l'échelle microscopique, un exemple où les domaines font quelques nanomètres ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Il s'agit d'une surface de cuivre sur laquelle ont été adsorbés des atomes d'oxygène, cas étudié par Peter Zeppenfeld et ses collègues, à Jülich en Allemagne(6,7) (fig. 2). Le microscope électronique à balayage révèle que les îlots oxygène-cuivre se disposent selon un arrangement périodique de bandes. L'espacement entre îlots varie entre 6 et 14 nm lorsque les atomes d'oxygène recouvrent 26 % de la surface. Cette architecture est attribuée à une compétition entre deux interactions (une attraction à courte portée entre les atomes et une répulsion d'origine élastique entre les îlots), une compétition similaire à celle qui prévaut dans les systèmes magnétiques(7).



Des configurations analogues s'observent avec des molécules organiques dotées d'un dipôle électrique* élevé, étalées en couches monomoléculaires à la surface de l'eau («monocouches de Langmuir»). On peut obtenir par exemple des domaines en forme d'aiguille (fig. 3). Là encore, une telle morphologie s'explique en termes d'une compétition entre deux interactions. Ici, le dipôle électrique de la molécule a une composante située dans le plan de la couche, en plus de la composante perpendiculaire à la surface de l'eau. La structure en domaines est due à la composante perpendiculaire, tandis que leur forme allongée tient à la deuxième composante du dipôle, comme l'ont montré en 1991 Pierre Muller et François Gallet à l'Ecole normale supérieure, à Paris(8).

On pourrait citer de multiples autres systèmes qui rentrent dans le même schéma: réarrangements spontanés de la structure cristalline à la surface d'un semi-conducteur, répartition des régions supraconductrices dans un matériau supraconducteur dans son état intermédiaire, films de cristaux liquides, fondus de polymère où la chaîne polymérique est constituée de deux blocs, membranes biologiques formées de mélanges de phospholipides, etc. Tous possèdent, à l'équilibre, une structure en domaines(1), la grandeur modulée dans l'espace étant la densité, la composition, l'orientation de l'aimantation, la polarisation, la morphologie, la contrainte élastique ou autre. Précisons en outre que ces structures ne sont pas forcément ordonnées et peuvent présenter des «défauts» par rapport à une périodicité parfaite.

Dans de nombreux cas, il est possible d'induire des transformations entre différentes morphologies en faisant varier un paramètre comme la température, la pression ou un champ électrique ou magnétique. Ces transitions, il est aussi possible de les décrire théoriquement avec un modèle intégrant deux interactions concurrentes.

Les transitions les mieux connues sont les passages, en deux dimensions, entre des structures à bandes et des arrangements périodiques de «gouttelettes» circulaires. En trois

dimensions, des transitions intéressantes ont été étudiées dans des alliages de deux polymères (copolymères diblocs) où la répartition des domaines est de symétrie cubique(9).

Une caractéristique essentielle des motifs considérés ici est qu'ils sont composés de domaines «malléables», pouvant subir diverses transformations morphologiques (fig. 4). Un domaine initialement sphérique (par exemple un domaine magnétique ou une goutte de ferrofluide) peut ainsi s'allonger, se ramifier et se courber. Une autre possibilité pour un grand domaine est de se scinder en éléments plus petits. De nombreuses équipes de recherche s'efforcent de comprendre, de manière générale, quelles sont les transformations que la nature privilégie, comment les contrôler et dans quelle mesure elles sont apparentées aux transitions entre un motif à rayures parallèles et un ensemble de domaines circulaires.

La tâche est encore loin d'être achevée. Si, pour une vaste classe de systèmes physiques ou chimiques, la sélection d'un motif périodique peut être interprétée en termes d'une compétition entre des interactions de portée différente, on ne comprend qu'imparfaitement comment est déterminée une morphologie particulière. Une fois éclaircis ces aspects, l'étape suivante sera de savoir contrôler la morphologie adoptée par le système. On pourra ainsi concevoir de nouveaux matériaux, dont on pourra maîtriser la structure microscopique; de nombreuses applications en découleront sans doute.

Bibliographie

- (1) M. Seul et D. Andelman, *Science*, 267, 477, 1995.
- (2) C. Kooy et U. Enz, *Philips Res. Repts.*, 15, 7, 1960.
- (3) Pour les applications aux mémoires, voir par exemple A.H. Eschenfelder, *Magnetic Bubbles Technology*, Springer-Verlag, 1980.
- (4) R.E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Cambridge University Press, 1985.
- (5) J.-C. Bacri *et al.*, *Progr. Colloid Polym. Sci.*, 98, 30, 1995.
- (6) K. Kern *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 67, 855, 1991.
- (7) P. Zeppenfeld *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 72, 2737, 1994.
- (8) P. Muller et F. Gallet, *J. Phys. Chem.*, 95, 3257, 1991.
- (9) E.N. Thomas *et al.*, *Nature*, 88, 589, 1988.